

METODA OKREŚLENIA ZUŻYCIA PANEWKI W POPRZECZNYM ŁOŻYSKU ŚLIZGOWYM

Ryszard WÓJCICKI*, Edward MURDZIA*

*Instytut Pojazdów, Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Łódzkiej, ul. Żeromskiego 116, 90-924 Łódź

ryszard.wojcicki@p.lodz.pl, edward.murdzia@p.lodz.pl

Streszczenie: Zmiany geometrii szczeliny smarowej filmu olejowego w procesie zużycia panewki mają znaczący wpływ na statyczne i dynamiczne właściwości hydrodynamicznych łożysk ślizgowych. W procesie badań wpływu zużycia na właściwości łożyska bardzo ważna jest wielkość zużycia w sensie geometrycznym oraz położenie obszaru zużycia. Zużycie zmienia geometrię filmu olejowego, stąd podstawą jest konieczność określenia głębokości i obszaru lokalnego zużycia powierzchni roboczej panewki. W badaniach zainicjowano metodę określenia zużycia, opartą na pomiarach zarysu okragłości powierzchni roboczej łożyska ślizgowego. W pracy przedstawiono metodę oraz analizy profilu zużycia powierzchni ślizgowej panewki w oparciu o badania stanowiskowe. Analizę przeprowadzono dla panewek wykonanych ze stopu łożyskowego PbSb15Sn10 oraz SnSb12Cu6Pb wg PN-ISO 4381:1997 (nazwa handlowa Ł16, Ł83) we współpracy ze stalowym czopem.

1. WSTĘP

W poprzecznych, hydrodynamicznych łożyskach ślizgowych obciążonych statycznie, przeznaczonych nominalnie do pracy w warunkach tarcia płynnego, występują okresy jego pracy przy tarcii mieszanej. Ma to miejsce w fazie rozruchu oraz zatrzymywania maszyny, kiedy prędkość obrotowa wału jest mniejsza od nominalnej. Występujące tarcie mieszane jest powodem zużywania się czopów i panewek. Proces zużycia w szczególności panewki łożyska ślizgowego powoduje zmiany geometrii szczeliny smarowej filmu olejowego. W pracy przedstawiono wyniki badań określenia profilu zużycia powierzchni ślizgowej panewki w oparciu o badania stanowiskowe. Przedstawiono metodę oraz analizy profilu zużycia powierzchni ślizgowej panewki tak w ujęciu ilościowym jak i jakościowym.

W celu porównania wyników badań zużycia prowadzono równocześnie pomiary zużycia metodą tradycyjną – wagową oraz przy pomocy indukcyjnych czujników przemieszczeń czopa (dotykowych i bezdotykowych). Porównano wyniki badań doświadczalnych z opracowanym matematycznym modelem powierzchni zużycia.

2. OPIS BADAŃ STANOWISKOWYCH

Właściwy dobór makro i mikrogeometrii łożyska ślizgowego: średnicy, długości, luzu łożyskowego, odchyłek kształtu oraz chropowatości powierzchni odgrywa istotną rolę w procesie projektowania węzła łożyskowego. Wszystkie wymienione wielkości wejściowe mają znaczący wpływ na charakterystyki trybologiczne pracy łożyska, ich dynamikę oraz intensywność zużycia. Przedmiotem badań stanowiskowych był wpływ procesu zużycia na charaktery-

styki trybologiczne. W tym artykule zaprezentowany zostanie jedynie fragment badań dotyczący sposobu pomiaru zużycia powierzchni roboczej panewki oraz analizy jej zarysu tak w ujęciu ilościowym jak i jakościowym.

Badania przeprowadzono na stanowisku badawczym (Wójcicki, 2007; Strzelecki i Wójcicki, 1999a, 1999b).

Analizując pracę węzła łożyskowego, wielkości charakterystyczne podzielono na dwie grupy:

- wielkości wejściowe (zadawane);
- wielkości wyjściowe (wynikowe).

Wielkości wejściowe to: obciążenie łożyska ślizgowego, prędkość poślizgu, temperatura i ciśnienie doprowadzanego środka smarowego, właściwości fizyko-chemiczne materiałów (czopa, panewki, środka smarowego), makro i mikrogeometria węzła (średnica, długość, luz w łożysku, chropowatość powierzchni).

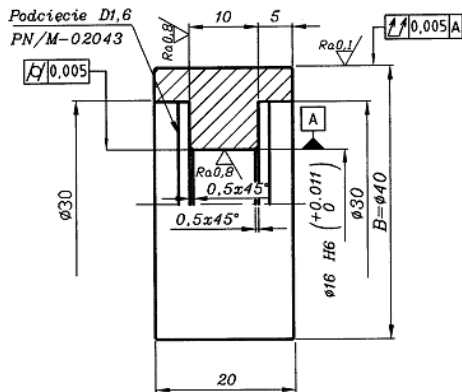
Wielkości wyjściowe: opory ruchu (opory tarcia, współczynnik tarcia) droga tarcia, zużycie (ubytek masy czopa, panewki), temperatura w węzle łożyskowym. W celu uwzględnienia w procesie badawczym wymienionych wielkości, stanowisko badawcze (Wójcicki, 2007; Strzelecki i Wójcicki, 1999a, 1999b) zawiera następujące układy sterująco-pomiarowe:

- układ przemieszczenia czopa;
- układ obciążenia badanego łożyska ślizgowego;
- układ sterowania prędkością poślizgu;
- układ smarowania zapewniający określoną temperaturę oraz ciśnienie czynnika smarującego;
- układ pomiarowy momentu tarcia w łożysku;
- układ pomiarowy temperatury łożyska, oleju zasilającego;
- układ pomiarowy prędkości obrotowej czopa;
- układ pomiarowy ciśnienia oleju dostarczonego do łożyska;
- układ oceny warunków tarcia.

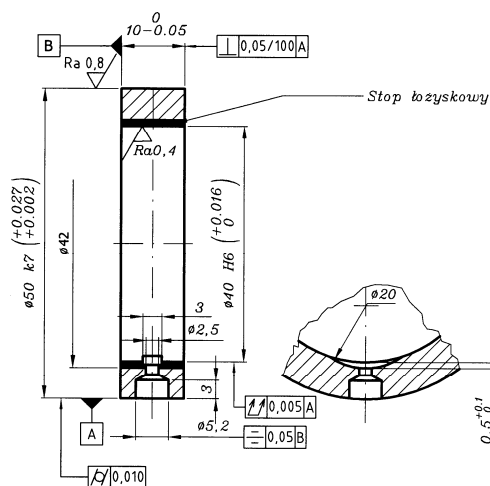
3. PRZEDMIOT I WARUNKI BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

Badania przeprowadzono na łożyskach ślizgowych gdzie pary cierne (rys. 1a, 1b) stanowiły skojarzenia:

- stalowy czop – panewka wylana stopem łożyskowym Ł16 (PbSb15Sn10 wg PN-ISO 4381:1997);
- stalowy czop – panewka wylana stopem łożyskowym Ł83 (SnSb12Cu6Pb wg PN-ISO 4381:1997).



Rys. 1a. Konstrukcja czopa



Rys. 1b. Konstrukcja panewki

Jako czynnik smarujący w badaniach zastosowano olej maszynowy VELOL 9 wg ZN-RNJe 4/98. Badania przeprowadzono dla następujących zestawów łożyskowych czop-panewka:

- z luzem względnym 1,15% oraz odchyłką kształtu okrągłości powierzchni roboczej panewki 8 μ m, (oznaczenie na rysunkach T35 – stop Ł16);
- z luzem względnym 2,9% i odchyłką 8,5 μ m, (oznaczenie na rysunkach T36 – stop Ł16);
- z luzem względnym 2,05% i odchyłką kształtu okrągłości powierzchni roboczej panewki 7 μ m, (oznaczenie na rysunkach M44 – stop Ł83);
- stosunek długości panewki do średnicy wynosił $l/d=0,25$.

Dla badań zestawów czop panewka przyjęto następujący zakres wielkości zadawanych:

- prędkość obrotowa czopa zmieniała się w czasie jednego cyklu trwającego 60 sekund w zakresie od 0÷350 obr./min według przebiegu – 20 sekund trwał okres rozruchu, 20 sekund utrzymywano stałą prędkość obrotową oraz 20 sekund proces zatrzymywania,
- wartość obciążenia zapewniała naciski średnie w łożysku 3MPa÷5MPa,
- temperatura oleju zasilającego wahała się w granicach 20÷21°C,
- ciśnienie oleju zasilającego ustalono około 0,05MPa.

4. OKREŚLENIE ZUŻYCIA NA PODSTAWIE POMIARU ODCHYLKI Kształtu OKRĄGŁOŚCI POWIERZCHNI ROBOCZEJ CZOPA ORAZ PANEWKI

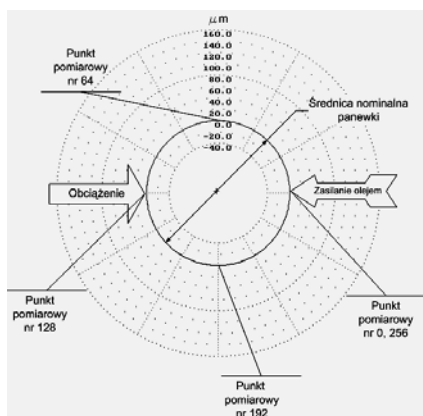
Dotychczas w badaniach przyjmowane są różne sposoby pomiaru zużycia. Do najpopularniejszych, często stosowanych również w badaniach podstawowych, jest pomiar masy zużycia. Pomiar ten nie wymaga skomplikowanej procedury jak i urządzeń pomiarowych. I to stanowi o popularności tego pomiaru. W niniejszej pracy badawczej również stosowano tę metodę, jednak uzyskane informacje z pomiarów mają bardzo ograniczone zastosowanie w badaniach właściwości poprzecznych łożysk ślizgowych pracujących w cyklu: tarcie mieszane - tarcie płynne - tarcie mieszane. Pomiar ten potwierdza tylko, że nastąpiło zużycie powierzchni roboczej panewki. W łożyskach ślizgowych pracujących w warunkach tarcia mieszanego, przy prawidłowym doborze materiałów pary třej, zużycie ściernie występuje przede wszystkim w roboczej części panewki. Dla badań wpływu zużycia na właściwości łożyska istotnym jest pomiar zużycia w sensie geometrycznym oraz położenie obszaru zużycia. Zużycie zmienia geometrię filmu olejowego, stąd konieczność określenia głębokości zużycia lokalnego, którą mierzono przez zmianę odchyłki kształtu okrągłości powierzchni roboczej panewki. Różnicę okrągłości przed i po próbie, nazwano w pracy geometrią zużycia.

Do pomiarów zastosowano komputerowy system pomiaru i zapisu odchyłki kształtu z wykorzystaniem stanowiska pomiarowego PIK-2. Profile okrągłości powierzchni roboczej panewki zdejmowano zawsze w takim samym układzie pomiarowym. Dla celów pomiarowych aby zapewnić powtarzalność mocowań panewki skonstruowano uchwyt z naniesionym na nim punktem bazowym względem którego ustalano położenie panewki przy pomiarach. Pod tym kątem również na powierzchni czołowej panewki w okolicy rowka smarowego cechowano punkt odniesienia - bazę, co zapewniało identyfikację ustawienia profilu przed i po eksploatacji łożyska. Położenie bazy pomiarowej rejestrowano w opracowanym programie komputerowym. Pomiaru powierzchni roboczej panewki obejmowały cztery profile odchyłki kształtu okrągłości wykonane w czterech płaszczyznach równoległych do powierzchni czołowej panewki. Na podstawie przeprowadzonych badań wstępnych zużycia panewki stwierdzono, że w większości prze-

badanych panewek zużycie występuje na mniejszym obwodzie niż połowa panewki. Profil panewki, który nie uległ zużyciu przyjmowano jako bazę odniesienia do pomiarów zużycia w analizowanej płaszczyźnie metodą pomiaru odchyłki kształtu okrągłości panewki. Porównując pomiary przed i po zużyciu można uzyskać informację o głębokości zużycia w różnych miejscach na obwodzie panewki (rysunek 2).

5. OPROGRAMOWANIE I SPOSÓB OKREŚLENIA ZUŻYCIA POWIERZCHNI ROBOCZEJ PANEWKI

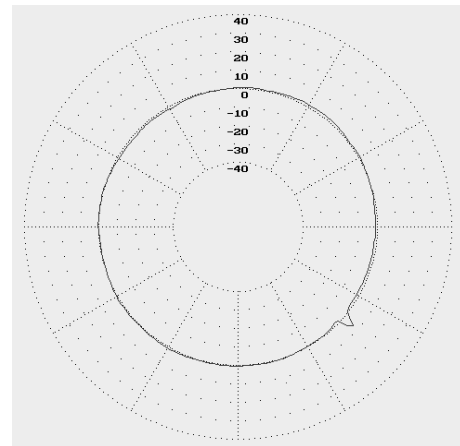
W celu realizacji pomiarów zużycia przy wymienionych założeniach opracowane zostały programy W1 oraz W2. Za pomocą pierwszego programu W1 tworzono w wyniku pomiaru powierzchni roboczej panewki dwa pliki. Jeden ze znacznikiem położenia punktu bazowego (rysy na panewce) i drugi z właściwym pomiarem powierzchni nominalnej pracującej panewki. W następstwie zużycia tworzono plik z profilem położenia bazy identyfikacyjnej ze znacznikiem (ryś) w oparciu o wycinek niepracującej powierzchni roboczej panewki. Dane z tego pliku służyły do wyznaczenia okręgu średniokwadratowego jako odniesienia porównawczego rzędnych profilu w każdym z 256 punktów pomiarowych. Plik z właściwymi pomiarami zużycia zawierał 3-krotny pomiar odchyłki okrągłości mierzone dla każdej płaszczyzny pomiarowej. Uśrednienie trzech pomiarów pozwoliło otrzymać bardziej wiarygodną bazę do określenia profilu zużycia panewki. Profile okrągłości powierzchni roboczej panewki przed badaniem eksploatacyjnym oraz po badaniu zdejmowano zawsze w takim samym układzie pomiarowym. Mierzono cztery profile panewki dla czterech różnych płaszczyzn położonych w odległości 1,5; 2,5; 7,5; 8,5mm od jednej z powierzchni bocznych. Porównując pomiary przed i po zużyciu można uzyskać informację o głębokości zużycia w różnych miejscach na obwodzie panewki. W rezultacie przeprowadzonych pomiarów oraz ich obróbki wymienionymi programami otrzymano wartości zużycia jako różnice odchyłek kształtu okrągłości przed i po próbie eksploatacyjnej. Wartości zużycia otrzymano dla każdego z 256 punktów równomiernie rozmieszczonych po obwodzie panewki (rysunek 2).



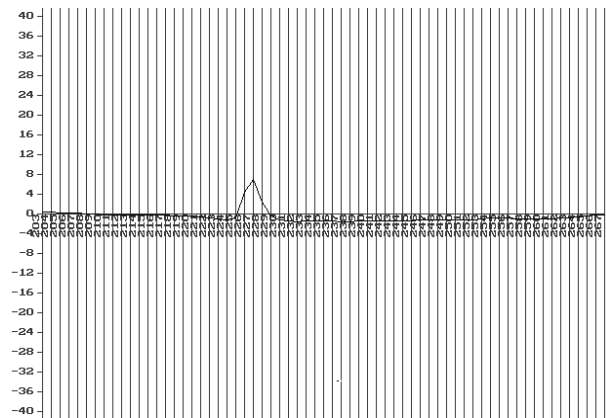
Rys. 2. Profil bazowy panewki - rozmieszczenie punktów pomiarowych na obwodzie panewki

5.1. Krótki opis programów W1, W2

Po uruchomieniu programu W1 wczytywany jest plik z pomiaru powierzchni czołowej zawierającej znacznik jako baza odniesienia (położenia) panewki w pomiarach. W pierwszym kroku, po obejrzeniu profilu okrągłości we współrzędnych biegunowych na ekranie, pozycjonuje się wstępnie panewkę na przyrządzie PIK2 (rysunek 3). Następnie w oparciu o zarys profilu okrągłości we współrzędnych biegunowych w pobliżu znacznika (rysy) wpisywany jest do programu numer punktu (na zarysie okrągłości) odpowiadający szczytowi rysy (przykładowo na rysunku 4 jest to punkt 227).



Rys. 3. Profil panewki we współrzędnych biegunowych

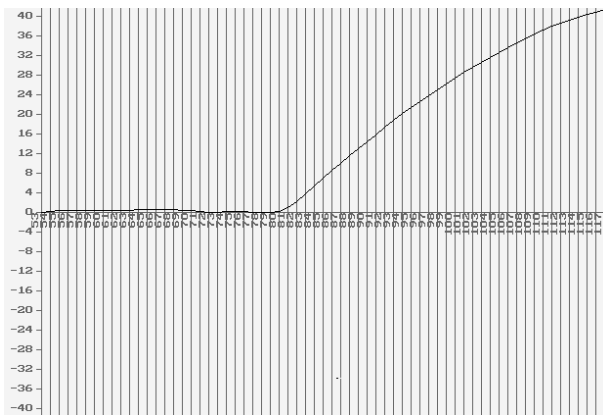


Rys. 4. Profil panewki we współrzędnych prostokątnych

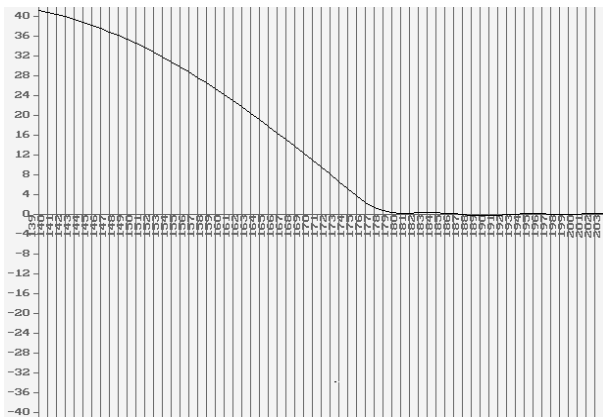
W drugim kroku należy wczytać właściwy plik z pomiarów okrągłości nominalnej powierzchni ślizgowej panewki. Dalej następuje uśrednienie pomiarów z 3 powtórzeń i obrót otrzymanego profilu okrągłości tak aby przyjął położenie w stosunku do wcześniej zidentyfikowanego znacznika. Po tych operacjach matematycznych program zapisuje plik pośredni o rozszerzeniu *.psr, który będzie wykorzystany do obliczeń zużycia w programie W2. W taki sposób wstępnie opracowuje się wszystkie pliki pomiarowe przed i po kolejnych etapach eksploatacji (próby) we wszystkich (czterech) płaszczyznach pomiarowych. Obszar nie zużytej powierzchni panewki do wyznaczania okręgu średniokwadratowego przyjmowano na podstawie oceny początku i końca profilu zuży-

cia w oparciu o szczegółową analizę grafiki ekranowej rysunków (rysunki 5 i 6). Metoda ta pozwala na dokładniejsze określenie profilu zużycia dla przypadków niewielkich łuków zużycia.

Program W2 służy do obliczenia wartości zużycia przy pomocy dokonanych uprzednio pomiarów okrągłości powierzchni roboczej panewki w oparciu o przetworzone wartości średnie odchyłek kształtu uzyskane programem W1. Wprowadzenie danych do programu W2 polega na wczytaniu dwóch plików (*.psr) z pomiarów tej samej panewki i na tej samej wysokości przed i po pewnym okresie eksploatacji. Na wstępie programowo wyznaczano okrąg średniokwadratowy z punktów nie zużytego obszaru połowy panewki (lub opcjonalnie z określonego wizualnie łuku zużycia – opcja, rys. 5 rys. 6) wokół otworu smarowniczego, a następnie obliczano nowe współrzędne punktów pomiarowych jako odległości od tego okręgu.



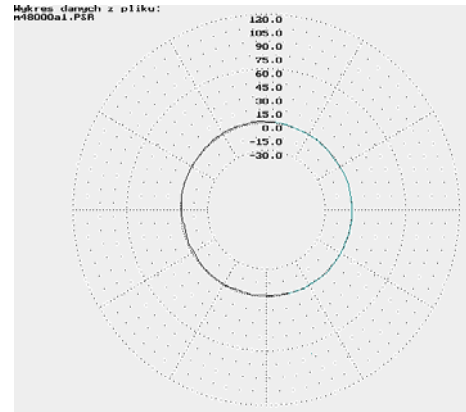
Rys. 5. Profil początku zarysu zużycia



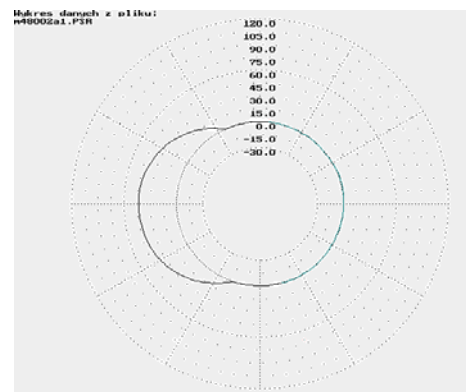
Rys. 6. Profil końca zarysu zużycia

Z tak przekształconych dwóch profili za pomocą programu W2 wyznaczano różnicę pomiędzy nimi, która jest bezpośrednio wartością zużycia w poszczególnych 256 punktach obwodu panewki. Na rysunku 7 przedstawiono zarys panewki bazowej (nie zużytej) w stosunku do której będą określone wartości zużycia panewki po określonym okresie pracy. Na rysunku 8 zamieszczono zarys zużytej panewki, natomiast rysunku 9 przedstawia profil zużycia, jako różnicę profilu bazowego i profilu zużytej powierzchni roboczej panewki. W programie uwzględniono możliwość bezpośredniego kopiowanie ekranu graficzne-

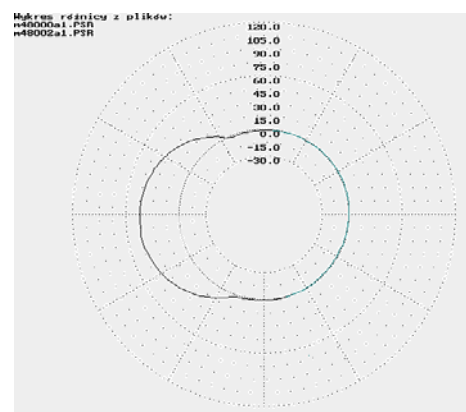
go i tekstowego z wynikami pomiarów na drukarkę. Możliwy jest wybór wielkości powiększenia podczas wyświetlania ekranów graficznych. Grafika zużycia dostępna jest w ujęciu biegunowym i we współrzędnych prostokątnych (rysunek 10). Wartości zużycia można odczytać z przybliżeniem z ekranów graficznych programu jak również bezwzględne dokładne wartości zużycia mogą być odczytane z tabeli generowanej przez program.



Rys. 7. Profil wyjściowy zarysu panewki



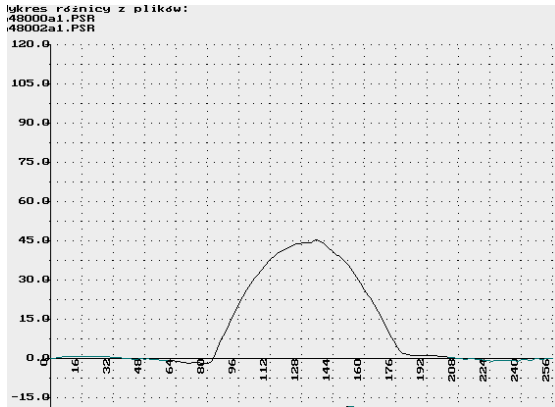
Rys. 8. Profil panewki po zużyciu



Rys. 9. Profil zużycia panewki

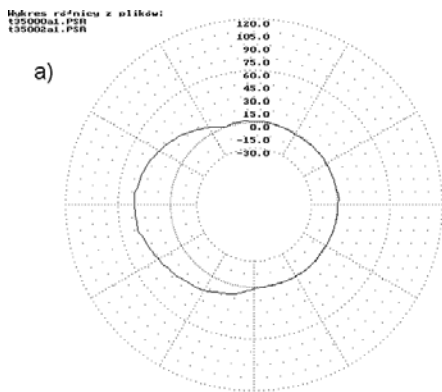
W celu zastosowania (wczytywania) profili zużytych panewek do innych programów, tworzony jest ponadto ich opis z wartościami zużycia panewki w 256 punktach z wprowadzonymi znakami tabulacji jako separatorami w postaci wynikowego pliku tekstowego z rozszerzeniem *.exl, który można wczytać do arkusza kalku-

lacyjnego EXCEL oraz w postaci pliku ASCII. Pomiar profilu okrągłości składa się początkowo z 1024 punktów pomiarowych, a następnie po uśrednieniu zapisywano go w postaci 256 punktów i w takiej postaci był transmitowany ze stanowiska pomiarowego do komputera.



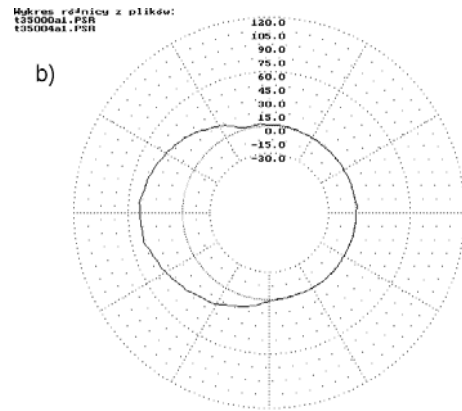
Rys. 10. Profil zużycia panewki (w układzie prostokątnym)

6. PRZYKŁADOWE WYNIKI BADAŃ – ANALIZA

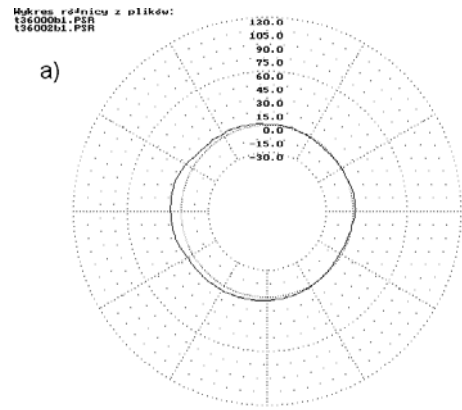


Rys. 11a. Zmiany zarysu zużytej powierzchni roboczej panewki T35 po 2 godz. pracy łożyska ślizgowego

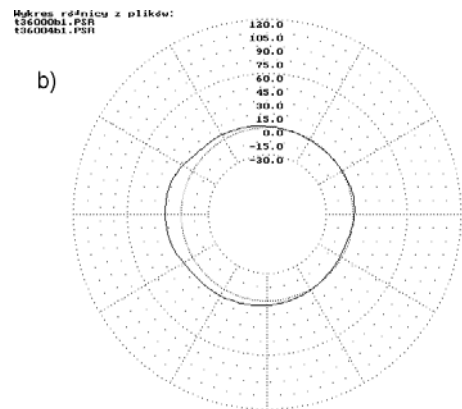
W wyniku pomiarów odchyłki kształtu okrągłości obu panewek i obróbki danych określono profil postępującego zużycia w postaci graficznej oraz w postaci plików danych ASCII do dalszego przetwarzania w celu obliczeń charakterystyk statycznych. Analizując otrzymane wyniki stwierdzono zróżnicowane charakterystyki tribologiczne dla badanych panewek ze stopu łożyskowego Ł16 tj. panewki T35 i T36. Panewka T35 z mniejszym luzem względnym (1,15‰) wykazywała większe zużycia masowe jak również większe zużycia określone w oparciu o metodę pomiaru odchyłki kształtu okrągłości (rysunek 11a, 11b). Obie panewki stabilizowały się pod względem intensywności zużycia po 2/3 próby tj. po drodze tarcia 5500 m. W przypadku panewki z mniejszym luzem w wyniku eksploatacji otrzymano na powierzchni pracującej mniejszy łuk zużycia ale zdecydowanie większej głębokości (rysunek 11a, 11b oraz rysunek 12a, 12b). W prowadzonych równolegle badaniach tribologicznych obu panewek bardziej korzystne charakterystyki tribologiczne (momentu tarcia, temperatury w styku) były dla łożyska z luzem 2,9‰.



Rys. 11b. Zmiany zarysu zużytej powierzchni roboczej panewki T35 po 4 godz. pracy łożyska ślizgowego

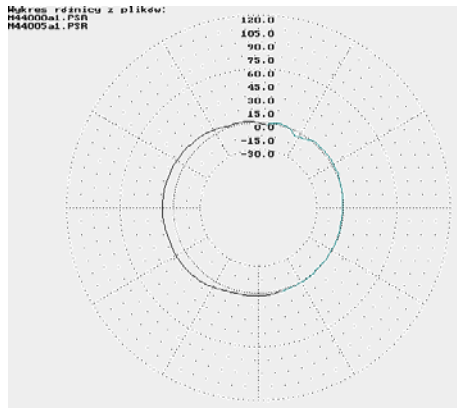


Rys. 12a. Zmiany zarysu zużytej powierzchni roboczej panewki T36 po 2 godz. pracy łożyska ślizgowego

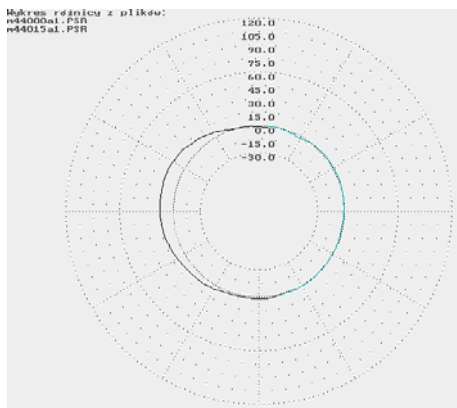


Rys. 12b. Zmiany zarysu zużytej powierzchni roboczej panewki T36 po 4 godz. pracy łożyska ślizgowego

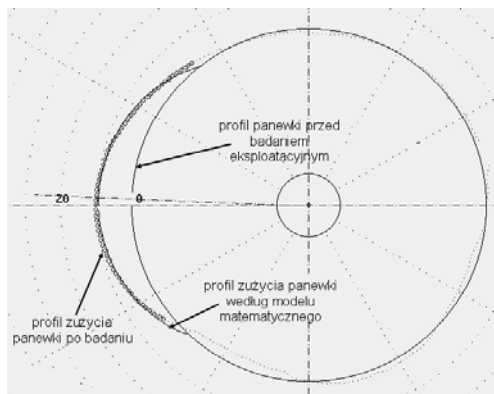
Podobny profil zużycia jak w przypadku panewki T36 (tak w ujęciu ilościowym i jakościowym) otrzymano w badaniach zużycia panewki M44 ze stopu Ł83 (rysunek 13a, 13b). Badania w tym przypadku prowadzono przy większych naciskach średnich 5 MPa (przy panewkach Ł16 wynosiły 3 MPa) oraz przy dłuższych okresach eksploatacji. Na podstawie przeprowadzonych badań zużycia panewek ze stopu Ł83 oraz porównując charakterystyki tribologiczne w zestawieniu ze stopem ołowiovym stwierdzono, że zdecydowanie lepsze właściwości tribologiczne posiada stop cynowy.



Rys. 13a. Zmiany zarysu zużytej powierzchni roboczej panewki M44 po 5 godz. pracy



Rys. 13b. Zmiany zarysu zużytej powierzchni roboczej panewki M44 po 15 godz. pracy łożyska ślizgowego



Rys. 14. Porównanie profilu zużycia panewki z badań eksperymentalnych oraz według modelu matematycznego

Otrzymane wyniki z badań eksperymentalnych zużycia panewek, a w szczególności łuków zużycia porównano z wynikami otrzymanymi dla opracowanego modelu matematycznego powierzchni zużycia (Wójcicki i Kaczan, 2007). Przykład porównania dla panewki wykonanej ze stopu Ł83 zamieszczono na rysunku 14.

7. PODSUMOWANIE – WNIOSKI

1. Opracowano nową metodę określenia zużycia powierzchni roboczej panewki opartą na pomiarze od-

chyłki kształtu okrągłości – dała ona dobre rezultaty przy błędzie okrągłości mniejszym od $5\div 7\mu\text{m}$ dla panewki przed eksploatacją.

2. Otrzymano dobrą zgodność pomiarów mimośrodowości oraz kąta położenia środków czopa i panewki na stanowisku badawczym z przemieszczeniami i kształtem zarysu pomierzonym w oparciu o analizę odchyłki kształtu okrągłości.
3. Udokładniono model fizyczny procesu zużycia przez eksperymentalne określenie geometrii wyjściowej panewki tj. położenia, długości łuku oraz lokalnej zmiany promienia panewki na łuku zużycia.
4. W oparciu o opracowaną metodę opisu zużycia na podstawie pomiarów kształtu okrągłości zarysu powierzchni ślizgowej panewki stwierdzono:
 - przydatność metody w zastosowaniu do pomiaru głębokości zużycia panewek jak i do wyznaczenia profilu zużycia,
 - zarys zużytej powierzchni panewki można z dobrą dokładnością określić jako łuk okręgu o stałym promieniu i wyznaczyć jego wartość,
 - profil powierzchni zużytej był bardzo regularny dla stopu Ł83, a mniej regularny dla panewki ze stopem Ł16 (stop Ł83 wykazywał zdolność do układania się z czopem).

LITERATURA

1. **Strzelecki S., Wójcicki R.** (1999a), Measurements of Tribological Characteristics in the Research of Journal Bearing Materials, *Journal of the Society of Tribologists and Lubrication Engineers*. No. 6, Vol. 55.
2. **Strzelecki S., Wójcicki R.** (1999b), Experimental comparison of frictional properties of bearing materials applied in the journal bearings of turbomachinery, *VII International Symposium INTERTRIBO 99*, Slovak Republic.
3. **Wójcicki R.** (2007), Wpływ zużycia panewki poprzecznego łożyska ślizgowego na jego charakterystyki tribologiczne, *Tribologia* 1/2007 (211), "Simpress" Warszawa, 273-285.
4. **Wójcicki R., Kaczan B.** (2007), Metoda określenia profilu zużycia panewki na podstawie badań doświadczalnych poprzecznych łożysk ślizgowych, *XXIII Sympozjon PKM*, Rzeszów-Przemyśl 2007, Tom 3, 257-267.

METHOD OF THE DETERMINATION OF SLEEVE WEAR IN RADIAL JOURNAL BEARING

Abstract: The variations of the geometry of lubricating gap in the process of sleeve wear have vital effect on the static and dynamic properties of hydrodynamic journal bearings. In the process of the investigation of wear effect on the bearing properties, the value of wear in the geometric sense and the position of wear range are very important. The wear causes the changes of oil film geometry, hence the necessity of the determination of the depth and range of local wear of sleeve operating surface. In the current investigation the method of the wear determination that is based on the measurements of the roundness profile of operating surface of journal bearing was developed. This paper presents the experimental method and the analysis of the wear profile of sleeve sliding surface. The analysis was carried out for the sleeves made of bearing material PbSb15Sn10 and SnSb12Cu6Pb according to PN-ISO 4381:1997 (commercial name Ł16, Ł83) operating with the steel journal.